

ISBN 978-5-328-00246-2

**ВЕСТНИК
Камчатского
государственного
технического
университета**



**Научный
журнал**

Основан в 2002 г.

ВЫПУСК

17

2011

Петропавловск-Камчатский

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Исаков А.Я. (главный редактор)	доктор технических наук, ректор Камчатского государственного технического университета
Ключкова Н.Г. (научный редактор)	доктор биологических наук, проректор по научной работе Камчатского государственного технического университета
Ольхина О.В. (ответственный секретарь)	заведующая издательством Камчатского государственного технического университета
Березовская В.А.	доктор географических наук, профессор кафедры экологии и природопользования Камчатского государственного технического университета
Карпенко В.И.	доктор биологических наук, заведующий кафедрой водных биоресурсов, рыболовства и аквакультуры Камчатского государственного технического университета
Коростылев С.Г.	доктор биологических наук, директор КамчатНИРО
Огий О.Г.	кандидат социологических наук, первый проректор Камчатского государственного технического университета
Осипов В.А.	доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и управления Камчатского государственного технического университета
Портнягин Н.Н.	доктор технических наук, профессор кафедры электро- и радиооборудования судов Камчатского государственного технического университета
Проценко И.Г.	доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем Камчатского государственного технического университета
Шевцов Б.М.	доктор технических наук, директор ИКИР ДВО РАН
Чаплыгина И.Д.	доктор филологических наук, ректор КГОУ ДВО «Камчатский институт ПКПК»

РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 550.34+551.24

МИГРАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ВУЛКАНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ЗОНАХ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НАИБОЛЕЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ МЕГАСТРУКТУР ЗЕМЛИ

А.В. Викулин¹, Г.М. Водинчар², В.К. Гусяков³, И.В. Мелекесцев⁴,
Д.Р. Акманова⁵, А.А. Долгая⁶, Н.А. Осипова⁷

^{1, 4, 5, 7} Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, 683006;

² Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Камчатский край, Елизовский район, пос. Паратунка, 684034;

³ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, 630090;

⁶ Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский, 683003

¹ e-mail: vik@kscnet.ru

² e-mail: gvodinchar@ikir.ru

³ e-mail: gvk@sscc.ru

⁶ e-mail: ann-dolgaya@yandex.ru

С целью изучения геодинамических процессов авторами была создана электронная база данных, в едином формате, включающая сейсмический (за 4,1 тыс. лет) и вулканический (за 12 тыс. лет) каталоги. В работе приводится краткое описание составленной базы данных и продолжается ее анализ, начатый в предыдущих публикациях «Вестника КамчатГТУ» (Викулин и др., 2009а, б). Анализировались свойства «энергетического» и временного распределений очагов землетрясений и извержений вулканов планеты. В пределах наиболее геодинамически активных зон Земли: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта – исследовалось явление миграции очагов землетрясений и извержений вулканов. Показано, что миграция для геодинамически активных зон планеты является характерным процессом. Определены зависимости скоростей миграции от энергетических характеристик. Показано, что выявленные зависимости отражают разные геодинамические обстановки в этих зонах, характеризующиеся сжатием и растяжением. Полученные данные позволяют по-новому подходить к физическому моделированию геодинамического процесса.

Ключевые слова: миграция, сейсмическая активность, вулканическая активность, напряженное состояние вещества.

Migration of seismic and volcanic activity and substance tension in zones with various geodynamic conditions. A.V.Vikulin¹, G.M.Vodinchar², V.K. Gussyakov³, I.V.Melekestsev⁴, D.R.Akmanova⁵, A.A.Dolgaya⁶, N.A.Osipova⁷ (^{1, 4, 5, 7}Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch of the R A S, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006; ²Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far Eastern Branch of the RA S, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, 684034; ³Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, ⁶Kamchatka State technical university, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003)

For the purpose of studying of geodynamic processes electronic database, in a uniform format including seismic (for 4,1 thousand years) and volcanic (for 12 thousand years) catalogs has been created. Short description of the created database is represented and its analysis presented in the previous publications «Vestnik KamchatG-TU» (Vikulin and others, 2009a,b) is continued. Properties of "power" and time distributions of the centers of earthquakes and eruptions of volcanoes of a planet were analyzed. Within the most geodynamic active zones of the Earth: suburbs of Pacific Ocean, the Alpijsko-Himalaya belt and the median-Atlantic ridge, the phenomenon of migration of the centers of earthquakes and eruptions of volcanoes was investigated. It is shown that migration for geodynamic active zones of a planet is a characteristic process. Dependences of speeds of migration on power characteristics are defined. It is shown that the received dependences reflect different geodynamic conditions in these zones, characterized by compression and stretching. The obtained data allows to approach to physical modeling of geodynamic process in a new way.

Key words: migration, seismic activity, volcanic activity, stress condition substance.

Исходные данные

На основании анализа имеющихся мировых и региональных списков землетрясений [8, 9, 24, 25, 28–33] был составлен каталог, содержащий данные о 12 725 событиях, произошедших за последние 4,1 тыс. лет: все известные данные о землетрясениях за 2150 г. до н.э. – 1899 г. и данные о сильных с $M \geq 6$ землетрясениях за 1900–2010 гг. Путем экспертной проверки из списка землетрясений были исключены все «дубли», «триплеты» и т. д., представляющие собой варианты одного и того же землетрясения, ошибочно попавшие в исходные каталоги из разных источников.

Наиболее полную информацию о вулканах и их извержениях содержат следующие источники [19, 36, 37], на основе которых с привлечением данных [21] и материалов И.В. Мелекесцева авторами была составлена электронная база, включающая данные о 627 вулканах мира, извергавшихся 6850 раз за последние 12 тыс. лет: 9650 г. до н.э. – 2010 г.

Все эти сейсмические и вулканические события легли в основу составленной авторами в едином формате базы данных [10–14], которая регулярно пополняется.

Характеристика базы данных

Сейсмические и вулканические события в базе характеризуются следующими параметрами: дата (год, месяц, день), время (час, мин, сек), координаты очага землетрясения или вулкана (долгота и широта в долях градуса), его глубина (для вулканических извержений принята за ноль). В качестве энергетической характеристики для землетрясений используется магнитуда M для извержений – величина W , значения которой $W = 1, 2, \dots, 5, \dots, 7$ в соответствии с [36, 37] определяются следующими объемами выброшенного материала $10^{-(4-5)}, 10^{-3}, \dots, 1, \dots, 10^2 \text{ км}^3$.

Построения выполнялись с помощью графической оболочки Integrated Tsunami Database for the Pacific (WinITDB), которая была создана в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН в рамках международной программы «Создание Интегрированной экспертной системы ITRIS» (2005–2007 гг.) [3, 38]. Эта оболочка содержит карту мира в цифровом виде с шагом по долготе и широте в 1 мин и создана с целью графических построений и анализа комплексных геофизических данных.

Числа содержащихся в базе землетрясений и извержений вулканов мира по последовательным интервалам продолжительностью 250 лет представлены на рис. 1.

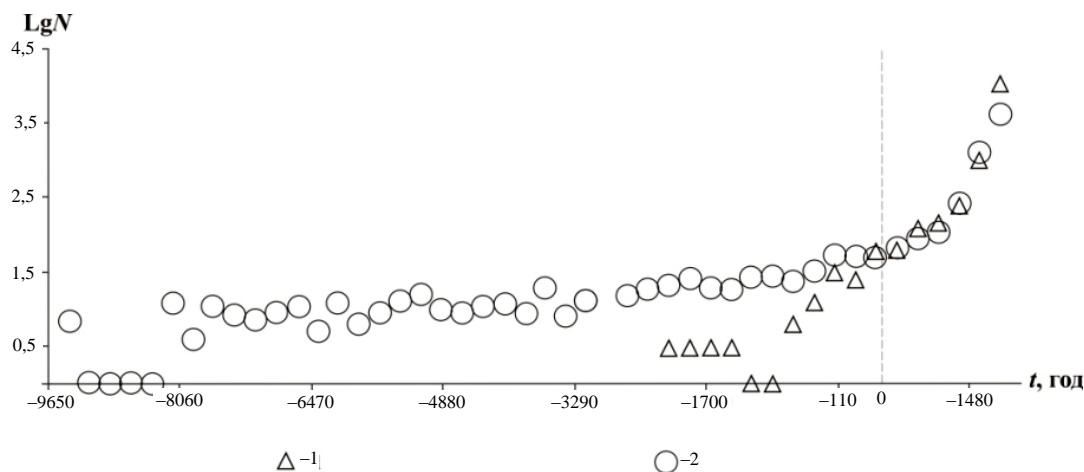


Рис. 1. Числа содержащихся в составленной авторами базе сейсмических (1) и вулканических (2) событий мира N , которые определены по последовательным интервалам продолжительностью 250 лет как функция времени t

Из данных на рис. 1 видно, что повторяемость содержащихся в базе событий постоянно увеличивается от примерно 7 землетрясений и 13 извержений за 250-летний интервал до начала нашей эры до соответственно 1500 и 800 событий за тот же интервал в начале XXI в. [2].

На рис. 2 приведены графики повторяемости землетрясений $LgN = -b \cdot M + a$ и извержений вулканов $LgN = -B \cdot W + A$, построенные по всем данным базы. Здесь N – числа событий величиной M и W ; b и B – углы наклонов графиков повторяемости; a и A – константы, численно равные нормированным величинам сейсмической и вулканической активности.

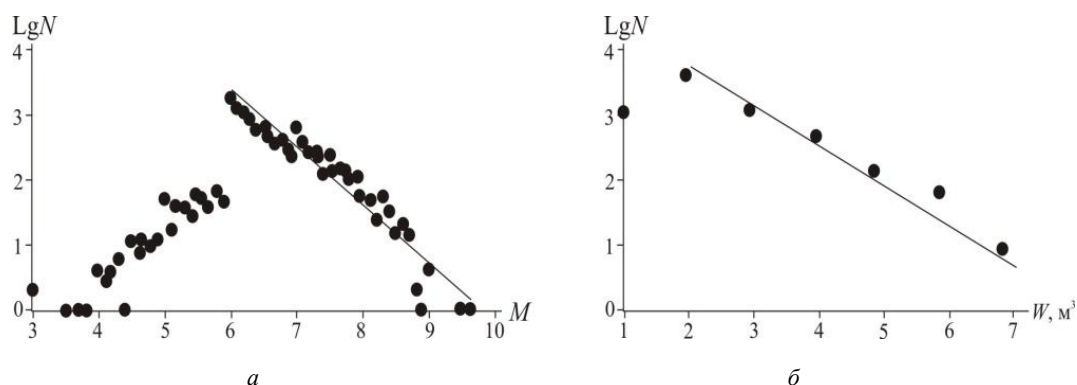


Рис. 2. Графики повторяемости землетрясений (а) и извержений вулканов мира (б);
 N – числа землетрясений и извержений вулканов

Данные об углах наклонов графиков повторяемости для разных регионов планеты, построенных в каждом случае по достаточно представительным выборкам, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения углов наклонов графиков повторяемости землетрясений (b) и извержений вулканов (B) для разных геодинамически активных регионов

Регион	Землетрясения				Извержения			
	$M_{\min} \div M_{\max}$	ΔT , год	N	b	$W_{\min} \div W_{\max}$	ΔT , год	N	B
Весь мир	$6 \div 9,5$	4160	10 495	$-0,9 \pm 0,3$	$2 \div 7$	11 658	6850	$-0,52 \pm 0,05$
Окраина Тихого океана	$6 \div 9,5$	1362	8527	$-0,8 \pm 0,1$	$2 \div 7$	11 658	5877	$-0,53 \pm 0,05$
п-ов Камчатка	$6 \div 8,7$	273	464	$-0,8 \pm 0,2$	$2 \div 7$	10 058	536	$-0,48 \pm 0,06$
влк. Безымянный (п-ов Камчатка)	–	–	–	–	$2 \div 5$	2460	53	$-0,38 \pm 0,13$
Альпийско-Гималайский регион	$7 \div 9$	4160	435	$-0,7 \pm 0,1$	$2 \div 7$	10 490	1600	$-0,57 \pm 0,05$
влк. Раунг (о. Ява)	–	–	–	–	$2 \div 5$	422	65	$-0,55 \pm 0,09$
влк. Этна (Италия)	–	–	–	–	$2 \div 5$	3508	186	$-0,63 \pm 0,15$
Срединно-Атлантический хребет	$6 \div 7,6$	100	124	$-1,2 \pm 0,1$	$2 \div 6$	10 920	311	$-0,42 \pm 0,09$
влк. Лаки (о. Исландия)	–	–	–	–	$2 \div 6$	10 234	63	$-0,34 \pm 0,12$

Примечание. ΔT и N – продолжительности каталогов и числа содержащихся в них событий соответственно.

Из данных, представленных в этой таблице, видно, что сейсмический процесс, реализуемый в областях с разными геодинамическими обстановками, в диапазоне $M \geq 6$ характеризуется и разными значениями углов наклона графиков повторяемости. Действительно, в областях сжатия – в пределах окраины Тихого океана и Альпийско-Гималайского пояса – углы наклона близки и составляют $b = -(0,7 \div 0,8) \pm 0,1$, тогда как в области растяжения – в пределах Срединно-Атлантического хребта – существенно меньшее значение $b = -1,2 \pm 0,1$ при общем значении для всей планеты, в целом равном $b = -0,9 \pm 0,3$.

В представительном диапазоне $W \geq 2$ различия в углах наклонов графиков повторяемости извержений вулканов, расположенных в разных регионах планеты, статистически не значимы. В целом для всех регионов и отдельно взятых вулканов, число извержений для которых достаточно велико и составляет не менее 50, угол наклона можно принять равным $B = -0,5 \pm 0,1$.

Таким образом, полученные авторами данные подтверждают ранее сделанный П.И. Токаревым [1987, 1991] и Г.С. Голицыным [2001, 2003] вывод о существовании закона повторяемости для вулканических извержений, что позволяет параметр W , как и магнитуду землетрясения M , рассматривать в качестве энергетической характеристики отдельно взятого извержения, их совокупности и всего вулканического процесса.

Исследовались распределения чисел сейсмических и вулканических событий по временным интервалам между ними для различных по масштабу регионов. Оказалось [2], что характерные периоды повторяемости землетрясений и извержений вулканов заключены в больших диапазонах 80–1000 и 180–3000 лет соответственно (рис. 3).

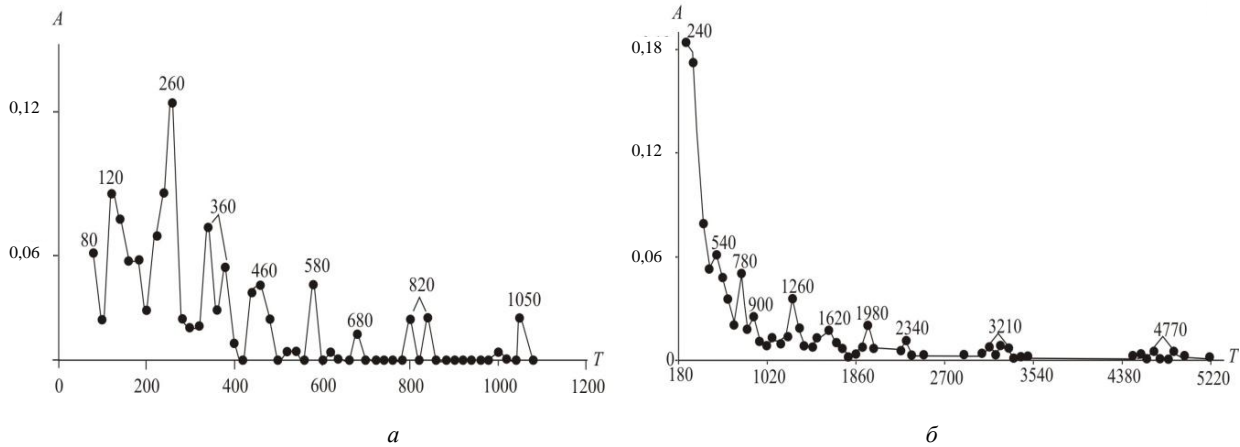


Рис. 3. Интенсивности выявленных сейсмических (а) и вулканических (б) гармоник (периодов):
 A – нормированные на единицу амплитуды выявленных периодов, T – периоды

Из данных на рис. 3 видно, что наибольшие амплитуды имеют гармоники с периодами $T_C = 260 \pm 20$ лет для сейсмического и $T_B = 240 \pm 60$ лет для вулканического процессов [11, 12, 14].

Миграция сейсмической и вулканической активности

Миграция очагов землетрясений впервые была установлена Ч. Рихтером в конце 1950-х гг. на примере Анатолийского разлома в Турции. Такое же явление было установлено и для других активных регионов Земли. В настоящее время существование миграции очагов землетрясений не вызывает сомнений [4]. Основные закономерности миграции очагов землетрясений установлены на примере окраины Тихого океана и описаны в [5–7].

Приведенные выше данные показывают, что извержения вулканов, как и землетрясения, представляют собой достаточно «организованную» совокупность событий, «подчиняющуюся» графику повторяемости (рис. 2, б) и вполне закономерным образом распределенную во времени (рис. 3, б). Именно такие данные и позволили авторам предположить существование явления миграции вулканических извержений и начать его исследование [1, 10, 11].

В настоящей работе впервые явление миграции сейсмической и вулканической активности исследуется на материале всех наиболее активных зон планеты: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайской зоны и Срединно-Атлантического хребта.

Сейсмические и вулканические события, рассматриваемые в совокупности, обладают одной весьма характерной особенностью – они распределены вдоль узких длинных поясов, окаймляющих всю планету (рис. 4). При этом пояса вулканов простираются примерно параллельно сейсмическим поясам. Такое их взаимное расположение позволяет изучение пространственно-временных закономерностей сейсмической и вулканической активности проводить на плоскостях с осями $L - t$, где t – время, L – координата, проходящая вдоль оси пояса.

Математическое определение линии, проходящей вдоль окраины Тихого океана, проводилось по 59 точкам (θ, λ) , отражающим все особенности простираения линий стыков тектонических плит вдоль окраины Тихоокеанского кольца. Были получены параметрические уравнения

интерполирующей кривой в виде
$$\begin{cases} \theta = \theta(\tau) \\ \lambda = \lambda(\tau) \end{cases} \quad \tau \in [0; 58],$$
 где географические широты $\theta(\tau)$ и дол-

готы $\lambda(\tau)$ являются кубическими дважды дифференцируемыми сплайнами. Тогда расстояние вдоль линии (окраины Тихого океана) по поверхности Земли от начальной точки ($\tau = 0$) до точки с текущими координатами $\theta(\tau)$, $\lambda(\tau)$ можно вычислить по формуле (1):

$$L = R_{Earth} \int_0^\tau \sqrt{\left(\frac{d\theta}{ds}\right)^2 + \cos^2 \theta(s) \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2} ds, \quad (1)$$

где θ и λ измеряются в радианах, R_{Earth} – радиус Земли.

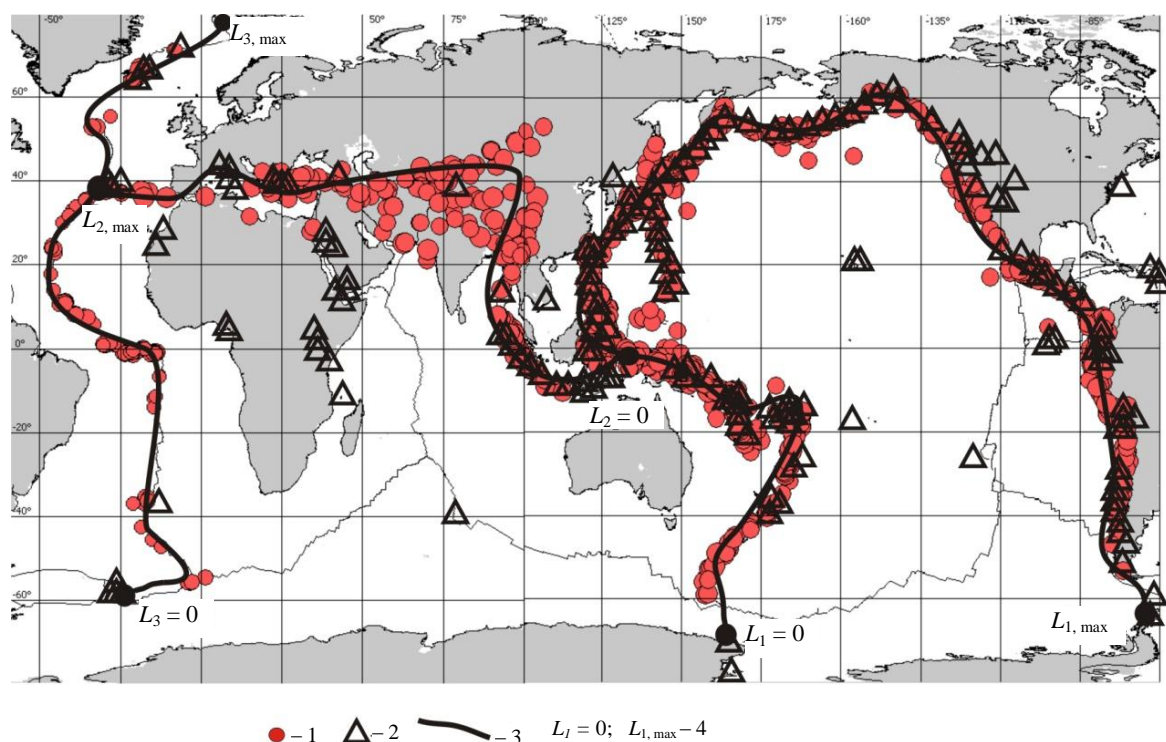


Рис. 4. Активные пояса планеты: 1 – очаги землетрясений; 2 – вулканы, 3 – линии вдоль осей поясов, по которым рассчитывались координаты очагов землетрясений и вулканов; 4 – начала и окончания поясов: $i = 1$ – окраина Тихого океана, $i = 2$ – Альпийско-Гималайский пояс, $i = 3$ – Срединно-Атлантический хребт

Общая протяженность всей окраины Тихого океана от вулкана Бакл Айленд (Антарктика) $L_1 = 0$ до вулкана Десепсьон (Южные Шетлендские о-ва) составляет $L_{1, \max} = 45\,000$ км. Оказалось, что большая часть всех очагов землетрясений и извержений вулканов в базе на всем этом протяжении в течение многих сотен лет на плоскости $L - t$ располагается вдоль отрезков прямых линий, наклоны которых определяют их скорости миграции. Эти данные позволили авторам сформулировать вывод о том, что миграция сейсмической и вулканической активности является характерным для окраины Тихого океана процессом [6, 7, 13, 14].

В настоящей работе представлены полученные авторами данные о миграции сейсмической и вулканической активности вдоль Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта. Переход от географических координат к L для этих зон осуществлялся таким же, как и для окраины Тихого океана, способом. Протяженности этих зон составили для Альпийско-Гималайского пояса: от $L_2 = 0$, о. Тимор (Индонезия), до $L_{2, \max} = 20\,500$ км, Азорские о-ва, и для Срединно-Атлантического хребта: от $L_3 = 0$, Южные Сандвичевы о-ва (Южная Атлантика), до $L_{3, \max} = 18\,600$ км, о. Исландия (Северная Атлантика). Продолжительности анализируемых каталогов землетрясений для этих зон составляют последние сто лет, полученные только в течение периода инструментальных наблюдений, который, как известно, был начат в самом конце XIX в. За предыдущие годы данные для разных участков Альпийско-Гималайского пояса являются существенно неоднородными. Для Срединно-Атлантического хребта данные до начала XX в. имеются только для ограниченных участков зоны и тоже достаточно неоднородны.

Алгоритм выделения миграционных цепочек сейсмических и вулканических событий в пределах каждой зоны, как и раньше [11–14], сводился к следующему: для каждого i -го события с координатой L_i и временем t_i в каталоге искалось такое $i+1$ -е событие, координата и время которого удовлетворяли условиям $L_{i+1} \geq L_i$, $t_{i+1} \geq t_i$. Событие, один раз попавшее в миграционную цепочку, из дальнейших построений исключалось. В результате для различных энергетических диапазонов было выявлено большое количество цепочек миграции сейсмических и вулканических событий. Примеры цепочек миграции представлены на рис. 5.

Видно, что и в пределах наземного Альпийско-Гималайского пояса и подводного Срединно-Атлантического хребта, как и вдоль окраины Тихого океана, миграция сейсмической и вулканической активности является весьма характерным процессом.

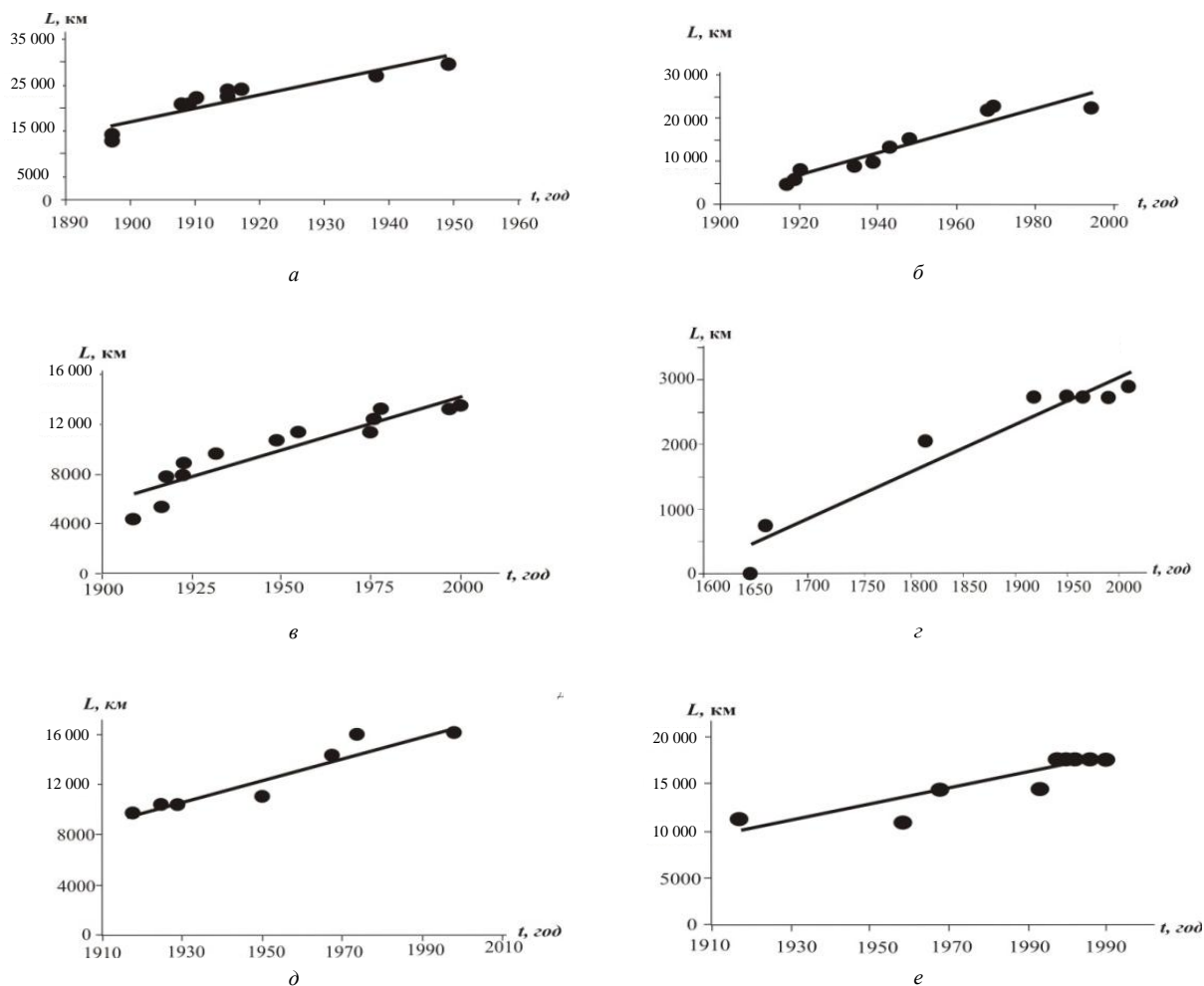


Рис. 5. Примеры миграционных цепочек: а – очагов тихоокеанских землетрясений с $M \geq 8$; б – тихоокеанских вулканических извержений с $W \geq 5$; в – очагов землетрясений с $M \geq 7$ в пределах Альпийско-Гималайского пояса; г – вулканических извержений с $W \geq 4$ вдоль Альпийско-Гималайского пояса; д – очагов землетрясений с $M \geq 7,2$ Срединно-Атлантического хребта; е – вулканических извержений с $W \geq 4$ Срединно-Атлантического хребта. Значения скоростей миграции для представленных на рис. 5 цепочек составляют $V = 300; 260; 85; 7; 90; 1,7$ км/год соответственно

Все данные по скоростям миграции сейсмической и вулканической активности, полученные нами как в этой, так и в предыдущих наших работах [1, 2, 6–14], представлены в табл. 2. Эти данные на настоящий момент времени представляют собой наиболее полный объем всех мировых данных по миграции сейсмической и вулканической активности планеты, поскольку они включают в себя и обобщают все опубликованные нами ранее данные, в том числе и данные, полученные другими исследователями, сведения о которых приведены в [6, 14].

Таблица 2

Значения параметров всех миграционных цепочек очагов землетрясений и вулканических извержений в пределах изучаемых регионов

Землетрясения					
M	k	$N \pm \Delta N$	$T \pm \Delta T$	$L \pm \Delta L$	$V \pm \Delta V$
1	2	3	4	5	6
Окраина Тихого океана					
$M \geq 6$	177	35 ± 11	110 ± 100	$18\,900 \pm 6600$	150 ± 60
$M \geq 6,5$	113	24 ± 8	140 ± 130	$18\,800 \pm 6500$	190 ± 40
$M \geq 7$	85	18 ± 6	170 ± 150	$17\,200 \pm 7600$	190 ± 90
$M \geq 7,5$	52	12 ± 3	190 ± 170	$17\,700 \pm 6600$	240 ± 90
$M \geq 8$	23	8 ± 2	260 ± 240	$19\,600 \pm 4900$	400 ± 230
$M \geq 8,5$	7	4 ± 1	320 ± 370	$13\,300 \pm 7800$	640 ± 500

1	2	3	4	5	6
Альпийско-Гималайский сейсмический пояс					
$M \geq 7$	30	10±3	550±720	6700±2300	280±290
$M \geq 7,2$	24	9±2	520±660	7100±2100	160±70
$M \geq 7,5$	20	7±2	450±530	7000±2400	370±150
$M \geq 7,7$	15	5±1	100±90	6800±2100	330±160
$M \geq 8$	4	4±1	110±60	3800±2200	590±280
Срединно-Атлантический хребет					
$M \geq 6$	19	6±2	40±30	5900±2500	340±250
$M \geq 6,2$	14	6±2	40±30	5900±2500	160±120
$M \geq 6,5$	8	5±1	50±20	5100±2600	170±130
$M \geq 6,7$	6	5±1	50±10	6000±2100	120±70
$M \geq 7$	5	4±0,3	50±10	4700±1600	90±30
$M \geq 7,2$	1	7	80	6400	90
Вулканические извержения					
W	k	$N \pm \Delta N$	$T \pm \Delta T$	$L \pm \Delta L$	$V \pm \Delta V$
Окраина Тихого океана					
$W \geq 1$	110	51±17	2150±2790	19 900±8400	70±50
$W \geq 2$	103	45±16	2280±2890	19 400±8900	60±40
$W \geq 3$	56	23±9	3490±3370	20 300±8300	60±80
$W \geq 4$	34	14±5	4470±3390	21 800±7800	20±20
$W \geq 5$	18	9±3	5010±3120	22 700±9700	13±14
$W \geq 6$	10	6±2	5050±2370	15 400±5200	3±1
Альпийско-Гималайский сейсмический пояс					
$W \geq 1$	43	37±15	1130±1420	4700±3300	13±7
$W \geq 2$	42	31±14	1150±1440	4700±3300	11±6
$W \geq 3$	23	13±6	1890±2020	4300±3400	9±8
$W \geq 4$	10	6±2	2750±2860	4300±3400	4±3
$W \geq 5$	5	4±1	3390±2500	4900±3600	3±2
Срединно-Атлантический хребет					
$W \geq 1$	12	21±12	3360±2840	4200±3500	2±2
$W \geq 2$	12	20±13	3110±2770	3400±2900	3±4
$W \geq 3$	7	16±9	4260±2450	6100±3300	1±0,5
$W \geq 4$	4	14±4	5620±1220	6200±3100	1±0,7
$W \geq 5$	2	4,5±0,5	1690±1560	2700±2100	0,3±0,01

Примечание. M – магнитуда землетрясения; W – «энергетическая» характеристика извержения; k – число выявленных миграционных цепочек; N – среднее число землетрясений/вулканических извержений в одной миграционной цепочке; T – средняя продолжительность миграционной цепочки (год); L – средняя протяженность миграционной цепочки (км); V – средняя скорость миграции очагов землетрясений и вулканических извержений для разных «энергетических» диапазонов (км/год); ΔN , ΔT , ΔL , ΔV – среднеквадратичные разбросы значений.

Миграция и геодинамическая обстановка

В соответствии с данными, приведенными на рис. 6, для каждой зоны в пределах большого энергетического диапазона между логарифмами скоростей миграции сейсмических и вулканических событий LgV и их величинами M и W выявляются вполне определенные прямолинейные зависимости:

$$-M \approx (3,7 \pm 0,6)LgV; \quad M \approx (1,5 \pm 0,7)LgV; \quad M \approx (-1,9 \pm 0,4)LgV \quad (2, \text{ а, б, в})$$

$$W \approx (-2,3 \pm 0,3)LgV; \quad W \approx (-3,8 \pm 1,2)LgV; \quad W \approx (-2,0 \pm 2,1)LgV \quad (2, \text{ г, д, е})$$

Сейсмические (2, а, б, в) и вулканические (2, г, д, е) зависимости, соответствующие графикам на рис. 6, определялись методом наименьших квадратов. Сейсмические зависимости определялись по всем представленным на рис. 6 значениям, во всем магнитудном диапазоне, вулканические – в диапазоне $W > 2$, как содержащем все извержения без пропусков. Среднеквадратичная ошибка в определении величин углов наклонов сейсмических (p_M) и вулканических (p_W) (1, а – е) по точкам на графиках лежит в пределах 0,3–2,1, равняясь в среднем величине

$$\Delta p_{M, W} = \Delta p \approx 0,9. \quad (3)$$

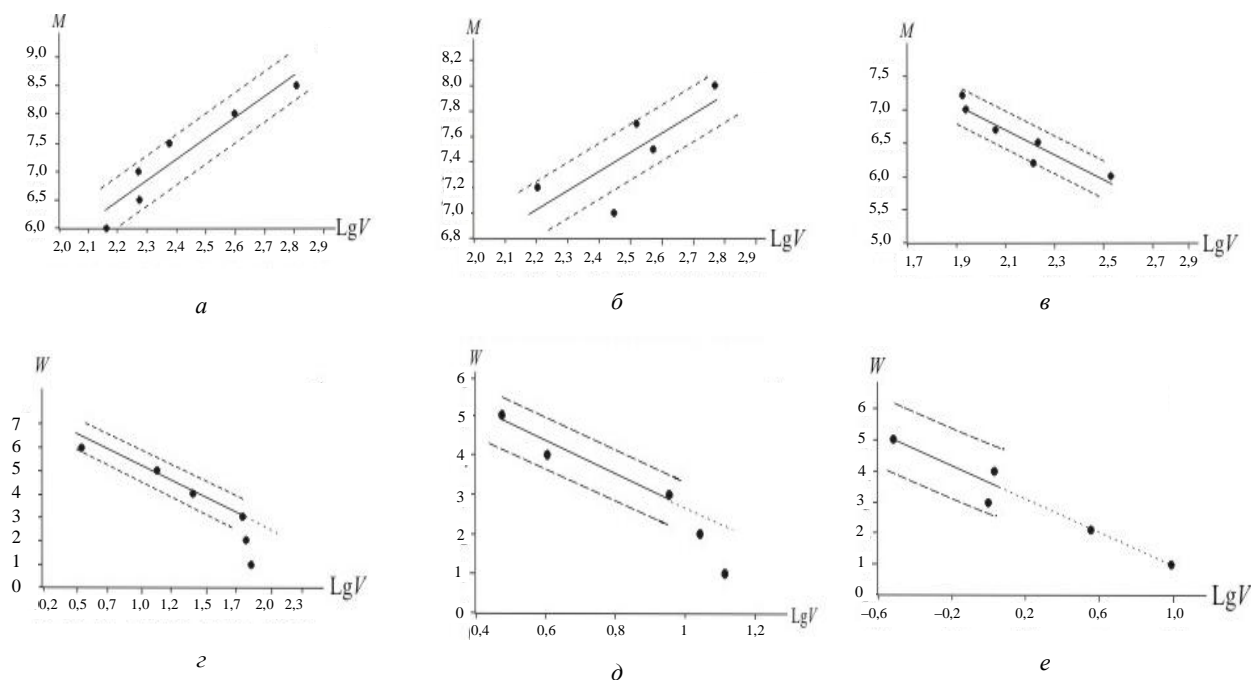


Рис. 6. Зависимости скоростей миграции V очагов землетрясений (а, б, в) и вулканических извержений (г, д, е) от энергетических характеристик событий M и W : а – для землетрясений окраины Тихого океана; б – для землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса; в – для землетрясений Срединно-Атлантического хребта; г – для извержений й окраины Тихого океана; д – для извержений Альпийско-Гималайского пояса; е – для извержений Срединно-Атлантического хребта

Наклоны графиков $LgV \approx p_{M,i} \cdot M$ для поясов, находящихся в разных геодинамических обстановках, существенно различны. Действительно, для окраины Тихого океана ($i = 1$, соотношение (2, а)) и Альпийско-Гималайского пояса ($i = 2$ (2, б)), являющихся, как известно, зонами сжатия, коэффициент $p_{M,1,2} > 0$ (рис. 6, а, б соответственно), а для Срединно-Атлантического хребта ($i = 3$ (2, в)), являющегося зоной растяжения – $p_{M,3} < 0$ (рис. 6, в).

Наклоны всех графиков $LgV \approx p_{W,i} \cdot W$, отражающих особенности миграции вулканических извержений вдоль всех активных поясов, являются отрицательными: $p_{W,i} < 0$, $i = 1, 2, 3$, соотношения (2, г – е), рис. 6, г – е. Такая тенденция уменьшения скорости миграции вулканических извержений с увеличением их величины W характерна для всех вулканических поясов и связана, по-видимому, с растягивающими напряжениями в пределах вулканических поясов, возникающими вследствие поднимающейся из глубины магмы.

Таким образом, полученные в работе данные показывают, что процесс миграции сейсмической и вулканической активности является достаточно «чувствительным» к характеру геодинамических движений в активных поясах и вблизи них – к сжатию (субдукции) и растяжению (спредингу).

Обсуждение результатов

В представленной работе, по-видимому, впервые «под одной обложкой» в едином формате были собраны данные о землетрясениях и извержениях вулканов планеты в течение продолжительного времени, многих тысяч лет. Эти данные, в совокупности с данными о движении границ тектонических плит за последние десятки – сто миллионов лет, позволяют решать большой круг задач геодинамики, объединяющей тесно взаимосвязанные между собой сейсмические, вулканические и тектонические процессы, наиболее активно протекающие, в первую очередь, в пределах узких активных поясов планеты. Первые результаты такого крупномасштабного исследования, проведенные в настоящей работе в течение последних лет, показывают это.

Подход к проблеме с достаточно общих позиций, как правило, позволяет по-новому подойти к постановке и к осмыслению самой основы наук о Земле. И первые результаты проведенного в настоящей статье исследования открывают принципиально новые возможности физической интерпретации выявленных геодинамических закономерностей.

Ранее нами было показано [15, 16], что энергетика движения тектонических плит планеты E_T имеет особенность, аналитическое выражение которой определяется зависимостью близкой

(2, a) – с «наклоном» примерно равным наклону зависимости, описывающей особенности мигрирующих землетрясений в пределах окраины Тихого океана:

$$p_T \approx p_{M1} = 3,7. \quad (4)$$

Геодинамическая активность планеты определяется в основном сейсмическим, вулканическим и тектоническим процессами. Это значит, что особенности энергетики геодинамического процесса, по сути, должны определяться соотношениями (2, $a - e$), дополненными аналогичным тектоническим соотношением $LgE_T \approx p_T LgV$ с «наклоном», определяемым соотношением (4).

Обращает на себя внимание следующая особенность геодинамического процесса. А именно, сумма значений наклонов всех сейсмических, вулканических и тектонических зависимостей, в совокупности, с учетом (3) и (4) примерно равна нулю:

$$\sum_{i=1}^3 p_{M,i} + \sum_{i=1}^3 p_{W,i} + p_T \pm 7\Delta p = -1,1(\pm 6,3) \approx 0 \quad (5)$$

при сумме модулей наклонов

$$\sum |p_{M,i}| + \sum |p_{W,i}| + |p_T| = 18,9. \quad (6)$$

Такое численное соотношение между выражениями (5) и (6) представляется неслучайным и позволяет предположить, что параметр $p = p_{M,W,T}$ является, по сути, сохраняющейся физической величиной.

Из механики известно, что производной от энергии системы (функции Лагранжа) по скорости является импульс [20]. Поэтому геодинамический параметр p – «наклоны» зависимостей (2, $a - e$) и соответствующих графиков на рис. 6, $a - e$, по сути, является механическим аналогом обобщенного импульса геодинамического процесса, протекающего в пределах активных зон планеты и вблизи от них. Действительно, дифференцируя полученные в двойном логарифмическом масштабе зависимости, получим:

$$p = \frac{d(\lg E)}{d(\lg V)} = \frac{V}{E} \cdot \frac{dE}{dV}.$$

Тогда в окрестности точки $(V_0; E_0)$, то есть в определенном диапазоне скоростей и энергий, величина $p \cdot (V_0/E_0)$ может интерпретироваться как импульс. Поскольку неопределенности в значениях скоростей и энергий (табл. 2) достаточно велики, можно считать, что окрестность точки (V_0, E_0) , по сути, покрывает весь исследуемый диапазон скоростей и энергий. В таком случае, продолжая механическую аналогию дальше, мы должны будем ожидать и существование «силовых» цепочек на плоскостях с осями «энергия (сейсмическая M , вулканическая W и тектоническая T)» – «обобщенная координата L ». Анализ показал, что «силовые» цепочки являются такими же характерными, как и «энергетические» цепочки, данные о которых приведены выше в табл. 2, соотношениях (2) и на рис. 6. Примеры «силовых» цепочек и их параметры на материале окраины Тихого океана приведены на рис. 7 и в табл. 3.

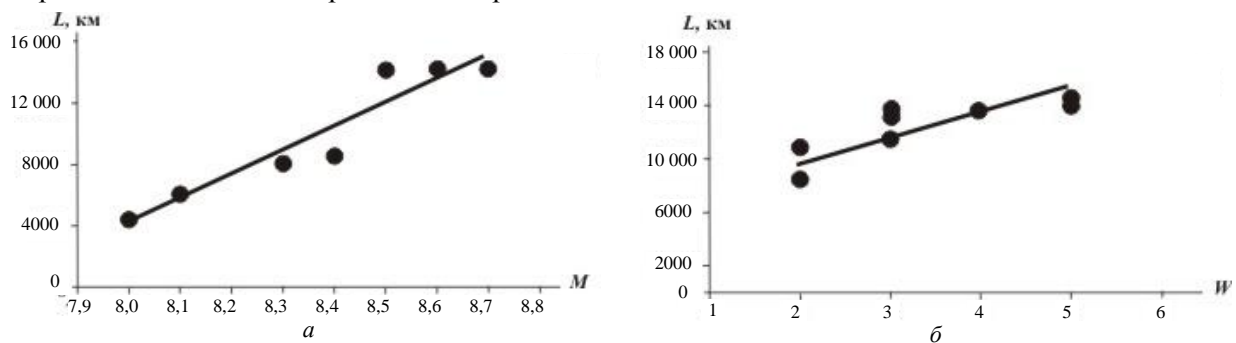


Рис. 7. Примеры «силовых» цепочек в пределах окраины Тихого океана:
а – очагов землетрясений с $M \geq 7,5$; б – вулканических извержений с $W \geq 2$

Очевидно, что наклоны таких цепочек могут являться механическим аналогом обобщенной силы геодинамического процесса в активных зонах планеты.

Таким образом, полученные в работе данные о закономерностях распределения очагов землетрясений и извержений вулканов в совокупности с данными о движении тектонических плит позволяют для геодинамического процесса определить параметры, являющиеся механическими аналогами импульса и силы. Двигаясь в этом направлении, в дальнейшем можно будет построить *принципиально новые*, опирающиеся на сейсмические, вулканические и тектонические данные, *физические модели*, описывающие геодинамические процессы в активных поясах планеты.

Таблица 3

Значения параметров всех «силовых» цепочек очагов землетрясений и вулканических извержений в пределах окраины Тихого океана

Землетрясения					
M	k	$N \pm \Delta N$	$\delta M \pm \Delta M$	$L \pm \Delta L$	$F \pm \Delta F$
$M \geq 6$	163	38 ± 12	$1,8 \pm 0,5$	20300 ± 9200	940 ± 380
$M \geq 6,5$	99	27 ± 8	$1,4 \pm 0,4$	21400 ± 8500	1200 ± 380
$M \geq 7$	71	22 ± 7	$1,2 \pm 0,3$	21300 ± 10900	1500 ± 830
$M \geq 7,5$	41	15 ± 4	$0,9 \pm 0,3$	26100 ± 8900	2400 ± 710
$M \geq 8$	23	8 ± 3	$0,5 \pm 0,3$	21500 ± 11100	2600 ± 1510
$M \geq 8,5$	7	5 ± 2	$0,4 \pm 0,2$	19300 ± 9800	4800 ± 3380
Вулканические извержения					
W	k	$N \pm \Delta N$	$\delta W \pm \Delta W$	$L \pm \Delta L$	$F \pm \Delta F$
$W \geq 1$	102	56 ± 22	$3,4 \pm 0,9$	22100 ± 10100	510 ± 280
$W \geq 2$	93	51 ± 20	$2,9 \pm 0,9$	21600 ± 7300	470 ± 220
$W \geq 3$	57	25 ± 9	$2,3 \pm 0,7$	18400 ± 5400	560 ± 190
$W \geq 4$	35	15 ± 6	$1,6 \pm 0,6$	19400 ± 7100	640 ± 220
$W \geq 5$	16	11 ± 3	$1,2 \pm 0,3$	20200 ± 9400	880 ± 260
$W \geq 6$	4	6 ± 2	$1,0 \pm 0,1$	16900 ± 6500	1010 ± 310

Примечание. M – магнитуда землетрясения; W – «энергетическая» характеристика извержения; k – число выявленных «силовых» цепочек; N – среднее число землетрясений/вулканических извержений в одной «силовой» цепочке; L – средняя протяженность «силовой» цепочки (км); F – средняя «сила» для разных «энергетических» диапазонов; $\delta M = M_{\min} - M_{\max}$, $\delta W = W_{\min} - W_{\max}$ – магнитудные диапазоны цепочек; M_{\min} , M_{\max} – минимальные и максимальные магнитуды в цепочке; W_{\min} , W_{\max} – минимальные и максимальные W в цепочке; ΔN , ΔM , ΔW , ΔL , ΔF – среднеквадратичные разбросы значений; δM – среднеквадратичный разброс диапазонов магнитуды; δW – среднеквадратичный разброс диапазонов W .

Литература

1. Акманова Д.Р. Пространственно-временные закономерности распределения вулканической активности окраины Тихого океана за последние 12 тыс. лет. // Материалы ежегод. конф., посвященной Дню вулканолога, 28–31 марта 2007. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. – С. 263–273.
2. Акманова Д.Р., Викулин А.В., Осипова Н.А. Вулканизм как индикатор геодинамических процессов // Вулканизм и геодинамика: Материалы IV Всерос. симп. по вулканологии и палеовулканологии, 22–27 сентября. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. – Т. 1. – С. 46–49. (http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/symposium_4/abstr/index.html)
3. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами / В.В. Бабайлов, С.А. Бейзель, А.А. Гусев и др. // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – Спец. выпуск № 2. – С. 4–20.
4. Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46. – № 11. – С. 1176–1190.
5. Викулин А.В. Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика // Геодинамика и Тектонофизика. – Т. 1. – № 2. – 2010. – С. 119–141.
6. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. – 150 с.
7. Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. – Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. – 463 с.
8. Викулин А.В., Ким Ч.У. Курило-Камчатские землетрясения. Данные наблюдений. 1911–1952 гг. – М.: МЦДБ, 1983. – 82 с.
9. Викулин А.В., Ким Ч.У. Курило-Камчатские землетрясения. Данные наблюдений. 1953–1961 гг. – М.: МЦДБ, 1983. – 84 с.
10. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана / А.В. Викулин, Г.М. Водинчар, И.В. Мелекесцев, Д.Р. Акманова, Н.А. Осипова // Солнечно-земные связи и

предвестники землетрясений: Сб. докл. IV междунар. конф. 14–17 августа 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. – С. 275–280.

11. Периодичность катастрофических извержений и их миграция вдоль окраины Тихого океана / А.В. Викулин, Д.Р. Акманова, Н.А. Осипова, С.В. Чебанюк, Т.В. Залипина, Ю.О. Фирсова, И.А. Ященко // Вестник КамчатГТУ. – 2009а. – № 10. – С. 7–17.

12. Повторяемость сильных землетрясений и миграции их очагов вдоль сейсмического пояса / А.В. Викулин, Д.Р. Акманова, Н.А. Осипова, С.В. Чебанюк, А.Ю. Михалина, Е.И. Сумакова, Е.В. Якимова // Вестник КамчатГТУ. – 2009б. – № 10. – С. 17–25.

13. Комплексная (катастрофические вулканические + сильнейшие сейсмические события) электронная база данных как основа для модифицированной геодинамической парадигмы (на примере Пацифики) / А.В. Викулин, И.В. Мелекесцев, В.К. Гусяков, Д.Р. Акманова, Н.А. Осипова // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тр. Второй региональной науч.-техн. конф. 11–17 октября 2009. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН. – 2010. – С. 13–19.

14. Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Вулканизм как индикатор геодинамических процессов // Литосфера. – № 3. – 2010. – С. 5–11.

15. Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Энергия тектонического процесса и вихревые геологические структуры: Докл. РАН. – 2007. – Т. 413. – № 3. – С. 372–374.

16. Викулин А.В., Тверитинова Т.Ю. Моментная волновая природа геологической среды // Вестник МГУ. Сер. Геологическая. – 2008. – № 6. – С. 16–19.

17. Гоглицын Г.С. Объяснение зависимости частота-объем извержений вулканов // Докл. АН. – 2003. – Т. 390. – № 3. – С. 394–396.

18. Гоглицын Г.С. Место закона Гутенберга-Рихтера среди других статистических законов природы // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. – М.: ГЕОС, 2001. – С. 138–161.

19. Гуценко И.И. Извержения вулканов мира. – М.: Наука. 1979. – 339 с.

20. Ландау А.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М.: Наука, 1973. – 208 с.

21. Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А. Радиоуглеродная хронология природных и социальных феноменов Северного полушария. – Иркутск: ИркГУ, 2010. – 715 с.

22. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – 536 с.

23. Осипова Н.А. Определение скоростей миграции тихоокеанских землетрясений в области магнитуд $M > 8.0$ // Материалы ежегод. конф., посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, – 2007. – С. 182–190.

24. Соловьев С.Л., Го Ч. Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. – М.: Наука, 1974. – 310 с.

25. Соловьев С.Л., Го Ч. Н. Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. – М.: Наука, 1975. – 204 с.

26. Токарев П.И. Характеристика и повторяемость вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. – 1987. – № 6. – С. 110–118.

27. Токарев П. И. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в XX в. и ее долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 6. – С. 52–58.

28. Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1926–1956) // Seismol. Bull. Japan Meteorolog. Agency. Suppl. 1. Tokyo, 1958. – 91 p.

29. Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1957–1962) // Seismol. Bull. Japan Meteorolog. Agency. Suppl. 2. Tokyo, 1966. – 47 p.

30. Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1963–1967) // Seismol. Bull. Japan Meteorolog. Agency. Suppl. 3. Tokyo, 1968. – 61 p.

31. Centennial Earthquake Catalog: (<http://earthquake.usgs.gov/research/data/centennial.php>)

32. Duda S. J. Global earthquakes 1903–1985. Hamburg F.R. Germany: NEIC, 1992. – 183 p.

33. ISC: (<http://www.isc.ac.uk/Bulletin/rectang.htm>).

34. JMA: (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>).

35. NEIC: (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epicglobal.html>)

36. Simkin T., Siebert L. Volcanoes of the world (catalogue). Published in association with the Smithsonian Institution, 1993. – 350 p.

37. <http://www.volcano.si.edu>.

38. ITDB/WLD – Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.16 of July 31, 2007. – 2007 (CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMG SB RAS, Novosibirsk).

Издание зарегистрировано в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций по Камчатскому краю
ПИ № ТУ 14-00048 от 21 ноября 2008 г.

Главный редактор А.Я. Исаков
Научный редактор Н.Г. Клочкова

Редактор О.В. Ольхина
Технический редактор О.А. Лыгина
Верстка, оригинал-макет О.А. Лыгина

Адрес редакции:

683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
Тел. (4152) 300–953. Факс (4152) 424–538
E-mail: kamchatgtu@kamchatgtu.ru

Подписано в печать 30.09.2011 г.
Формат 60*84/8. Печать цифровая. Гарнитура Times New Roman
Авт. л. 13,29. Уч.-изд. л. 13,75. Усл. печ. л. 14,53
Тираж 500 экз. Заказ № 85

Отпечатано участком оперативной полиграфии издательства
ФГБОУ ВПО «Камчатский государственный технический университет»